

Auswirkungen des autonomen Fahrens
auf das Fahrzeugkonzept

13

Hermann Winner, Walther Wachenfeld

Inhaltsverzeichnis

13.1	Einleitung	266
13.2	Autobahnautomat und Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer	268
13.2.1	Auswirkungen auf das Karosseriekonzept	269
13.2.2	Auswirkungen auf das Antriebskonzept	269
13.2.3	Auswirkungen auf das Fahrwerkskonzept	270
13.2.4	Auswirkungen auf den Innenraum und die Mensch-Maschine-Interaktion	271
13.3	Autonomes Valet-Parken	272
13.4	Vehicle-on-Demand	272
13.4.1	Auswirkungen auf das Karosseriekonzept	273
13.4.2	Auswirkungen auf das Antriebskonzept	274
13.4.3	Auswirkungen auf das Fahrwerk	275
13.4.4	Auswirkungen auf den Innenraum und die Mensch-Maschine-Schnittstelle	279
13.5	Use-Case-Gesamtbetrachtung	280
13.6	Fahrzeugübergreifende Änderungen	281
13.7	Folgekonzepte	282
13.8	Zusammenfassung und Ausblick	283
	Literatur	284

H. Winner (✉)
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik – FZD, Deutschland
winner@fzd.tu-darmstadt.de

W. Wachenfeld
Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik – FZD, Deutschland
wachenfeld@fzd.tu-darmstadt.de

13.1 Einleitung

Nach der Erfindung des Automobils durch Carl Benz im Jahr 1886 haben sich zum Teil sehr unterschiedliche Fahrzeugkonzepte gebildet. Einiges ist als konsequente Weiterentwicklung und Ablösung vorheriger Konzepte zu sehen, wie die Abkehr vom Kutschen-Design und die Integration der Räder und des Fahrwerks unterhalb der Karosserie oder die selbsttragende Karosserie. Als Haupteinfluss auf das Fahrzeugkonzept kann der Einsatzzweck betrachtet werden, der besonders deutlich wird, wenn Nutzkraftfahrzeuge mit einbezogen werden. Aber auch im Bereich der Personenkraftwagen hat sich eine Vielfalt entwickelt, von Lifestyle geprägten Cabrios und SUV bis hin zu Allzweckfahrzeugen mit Stufen- und Fließheck sowie Kombis und (Mini)Vans. Der Nutzungszweck steht bei Kleinlieferwagen, Kleinbussen und auf anderen Märkten bei den sogenannten Light-Trucks noch stärker im Vordergrund. Unter der Haube haben sich die Antriebskonzepte nach einer Dominanz von Verbrennungskraftmaschinen, zumeist in Form von längseingebauten Motoren mit Hinterradantrieb, in den letzten Dekaden zu einem immer größeren Teil in Richtung quereingebaute Frontmotoren mit Vorderradantrieb verschoben. Weiterführend stellt die Elektrifizierung des Antriebsstrangs einen aktuellen Trend dar, der durch CO₂-Vorgaben, geringere Geräuschbelastung und weitere Vorteile zukunftsfähig erscheint. Trotz aller Verschiebungen der Anteile ist ein „Aussterben“ bestehender Antriebskonzepte nicht zu erwarten, da die Divergenz der Optimierungsziele unterschiedlicher Marktsegmente diese Diversifizierung der Konzepte weiterhin tragen wird. So stellt ein ländlicher Bereich in den USA gravierend andere Anforderungen an den Antrieb als eine chinesische Großstadt.

Zu der auf dem Markt befindlichen Fahrzeugmodellvielfalt gesellt sich die Konzeptvielfalt der „Show Cars“, die auf Automobilmesse präsentiert wird. Nur in wenigen Fällen spielen Assistenzsysteme und Teilautomatisierung bei den bekannten Fahrzeugen eine konzeptändernde Rolle. Die in den letzten Jahren erkennbare Tendenz zur geringeren Übersichtlichkeit der Fahrzeuge, die durch Stylinganforderungen und/oder Anforderungen an die Steifigkeit der Karosserie begründet wird, fördert jedoch den Einsatz von kompensierenden Systemen wie Ultraschall-Einparkhilfe, Rückfahrkamera oder Surround-View-Darstellung. Zumeist besitzen Fahrerassistenzsysteme aber keine konzeptändernde Rolle, da nur wenige in der Baureihen-Serienausstattung enthalten sind. Somit verbleibt für den Fahrzeughersteller die Anforderung, das Fahrzeug so zu entwickeln, dass auch nicht ausgerüstete Fahrzeuge sicher durch den Fahrer geführt werden können. Da zudem darauf zu achten ist, dass bei teilautomatisiertem Fahren die Übernahmebereitschaft und -fähigkeit [1] beim Fahrer vorausgesetzt wird, ist nicht mit großen Änderungen gegenüber herkömmlichen Fahrzeugen zu rechnen. Lediglich Konzepte, die eine Übernahme begünstigen, wie z. B. neue Mensch-Maschine-Schnittstellen für die Beauftragung einer teilautomatischen Funktion, könnten Einzug halten [2]. Frühere, aber auch noch aktuelle Drive-by-Wire-Konzepte mit alternativen Bedienelementen (vgl. [3]) beschränkten sich auf den Ersatz der Lenk- und Pedalfunktion, ohne eine Automatisierung höherer Fahrzeugführungsebenen, die zum automatisierten Fahren unverzichtbar sind, konzeptionell vorzusehen.

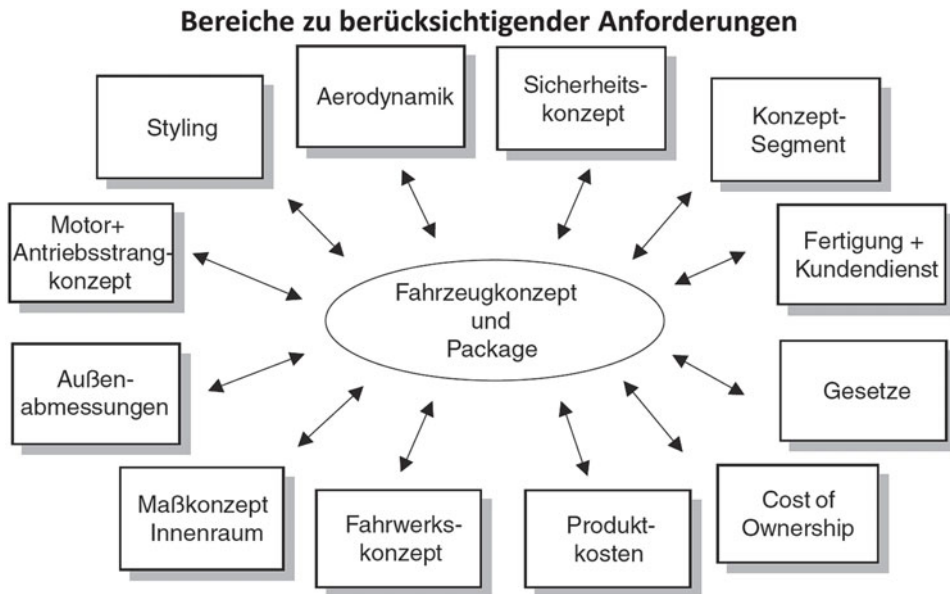


Abb. 13.1 Anforderungsbereiche für eine Konzeptentscheidung [4]

Auch wenn bisher noch kein Trend zu einem anderen Konzept aufgrund der höheren Automatisierung festzustellen ist, kann bei einer erheblichen Änderung der Fahrzeugführung dies anders aussehen. Daraus leitet sich die Frage ab: Bringt die Möglichkeit des autonomen Fahrens die aktuelle Konzeptwelt der Automobile durcheinander, sei es durch starke Verschiebung der Marktanteile oder durch neue Konzepte?

Bevor auf die Frage weiter eingegangen wird, soll eine Abgrenzung der konzeptbestimmenden Merkmale erfolgen, damit eine gleichmäßige, das Gesamtfahrzeug betreffende Ebene geschaffen wird und die nochmals vielfältigere Welt der Detaillösungen ausgeblendet werden kann. Dabei sind zuvor die Anforderungen zu identifizieren, die später die Konzeptauswahl dominieren werden.

In Abb. 13.1 ist eine Auswahl von Bereichen dargestellt, aus denen sich die Anforderungen ergeben. Viele der Anforderungen sind physikalisch – oftmals konfliktionär – verknüpft und nur über einen Abwägungs- und Priorisierungsprozess miteinander vereinbar, wie z. B. eine stromlinienförmige Aerodynamik im Gegensatz zu markanten Stylingkomponenten.

Für die hier beabsichtigte Diskussion der obersten Konzeptebene werden die Konzepte hinsichtlich

- Karosserie,
- Antrieb,
- Fahrwerk,
- Innenraum,
- Mensch-Maschine-Schnittstelle (MMS)

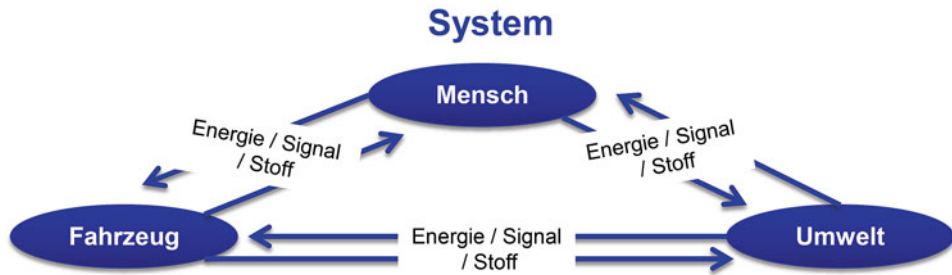


Abb. 13.2 Systembetrachtung Fahrer-Fahrzeug-Umwelt

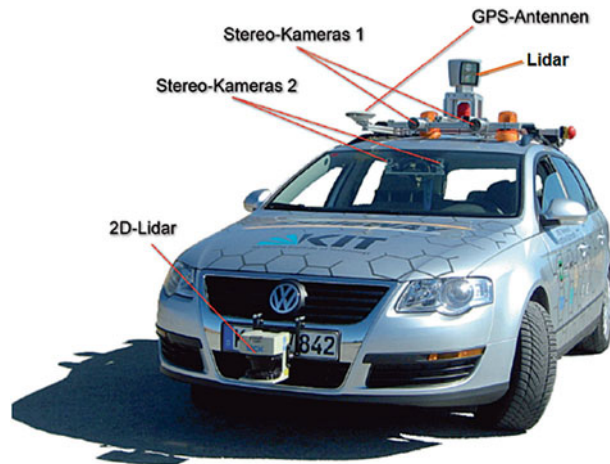
unterschieden. Als Baugruppen des Fahrzeugs stehen diese immer in einem Zusammenhang zum Insassen und der Umwelt, insbesondere dem Umfeld Straße. Die Interaktion zwischen diesen Bereichen kann abstrakt als Austausch von Stoff, Energie und Signal dargestellt werden (s. Abb. 13.2). Da die Fahrzeugautomatisierung diesen Austausch grundlegend verändert, werden auch die Baugruppen beeinflusst. Ein Beispiel der Automatisierungsauswirkung ist der Signalaustausch zwischen Umwelt und Mensch. Der Insasse muss nun nicht mehr der Fahraufgabe nachgehen und benötigt dementsprechend auch keinen Signalaustausch mit der Umwelt, um sein Fahrtziel zu erreichen. Dieser auf dem Austausch von Stoff, Energie und Signal basierende Ansatz ermöglicht eine weitere Strukturierung der Analyse unter Berücksichtigung der Schnittstellen.

Im Folgenden werden diese konzeptbestimmenden Bereiche und ihre Schnittstellen für die in Kap. 2 ausgewählten Use-Cases und die damit möglichen Anwendungsszenarien im Einzelnen betrachtet.

13.2 Autobahnavtomat und Vollautomat mit Verfügbarkeitsfahrer

Obwohl sich die zwei Use-Cases „Autobahnavtomat“ und „Vollautomat“ in ihrer Leistungsfähigkeit bezüglich der autonomen Fahrt deutlich unterscheiden, lassen sich hinsichtlich der Fahrzeugkonzeptüberlegungen keine Unterschiede finden, da beide Use-Cases an einen Verfügbarkeitsfahrer gebunden sind. Beim Use-Case „Vollautomat“ kann der Einsatzbereich der autonomen Fahrt ausgedehnter sein und verlangt seltener eine Übernahme. Aber in beiden Fällen muss gewährleistet sein, dass eine Fahrzeugführung durch einen fahrberechtigten Menschen in seiner Funktion als Verfügbarkeitsfahrer ohne Einschränkung möglich ist. Damit ist für beide Fälle die Fahrzeugführung als „Mischbetrieb“ – autonom oder manuell – zu unterstützen.

Abb. 13.3 Umfeldsensorik Versuchsfahrzeug Team Anyway [5]



13.2.1 Auswirkungen auf das Karosseriekonzept

Für die weiterhin vorgesehene manuelle Fahrzeugführung ist keine konzeptbestimmende Änderung gegenüber den zu erwartenden Vergleichskonzepten, die keine Fähigkeit zum autonomen Fahren vorsehen, erkennbar. Solange das sogenannte Erweiterungs- und Verfügbarkeitskonzept (s. Kap. 2) auf der Regelung durch den Fahrer basiert, beschränkt dies die Freiheitsgrade des Karosseriekonzepts. Die Außenmaße des Fahrzeugs sowie die Anordnung und Größen der Scheiben müssen dann auch weiterhin dem Fahrer angepasst werden, sodass entsprechend ähnliche Ausführungen wie heutzutage erwartet werden.

Als Voraussetzung für das autonome Fahren ist eine Sensorik für nahezu alle Sichtrichtungen gefordert, die sicherlich zu im Detail aufwendigen Package-Lösungen führen mag, wenn wie bisher eine nur dezente Sichtbarkeit angestrebt wird. Sollte tatsächlich ein Zeichen für die Fähigkeit, autonom zu fahren, gesetzt werden, so käme das den Entwicklern zugute, um im wahrsten Sinne des Wortes herausragende Sensorpositionen besetzen zu können (s. als Beispiel Abb. 13.3). Ansonsten ist keine größere Abweichung des Fahrzeugkonzepts zu Vergleichsfahrzeugen zu erwarten, da mit diesen Use-Cases den bestehenden Konzepten „nur“ ein neues Feature hinzugefügt wurde, ohne die Grundbestimmung des Fahrzeugs oder des Einsatzbereiches zu berühren.

13.2.2 Auswirkungen auf das Antriebskonzept

Für die potenziell verbleibenden manuellen Fahrtanteile gibt es keinen Grund, das Antriebskonzept anders zu bewerten als für vergleichbare, nicht autonome Fahrzeuge. Allerdings vereinfacht die autonome Fahrt gegenüber der manuellen Fahrt eine Einbindung in die Verkehrstelematik, und somit wird eine effizientere Fahrt möglich. Die Fahrweise kann

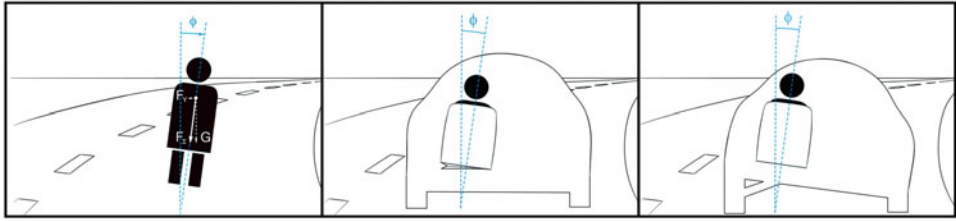


Abb. 13.4 Neigekonzept bei Kurvenfahrt: links: Addition der Kräfte, die auf Insassen wirken; Mitte: Sitzneigung; rechts: Neigung mittels Fahrwerk

je nach Zeit- oder Energiebedarf gesteuert werden. Grundsätzlich stehen diese Möglichkeiten bereits den Fahrzeugen mit Teil- oder Hochautomatisierung zur Verfügung, sodass sich kaum relevante Änderungen im Antriebskonzept wegen des weiteren Schritts zum autonomen Fahren ergeben. Es sind eher die neuen Vernetzungsmöglichkeiten, die Antriebskonzepten mit geringerer Gesamtverfügbarkeit, wie den batterieelektrischen Antrieben, zugutekommen.

13.2.3 Auswirkungen auf das Fahrwerkskonzept

Während für die manuelle Fahrt ein Fahrwerk mit üblichen Anforderungen benötigt wird, ermöglichen lange Phasen der autonomen Fahrt die Entkopplung des oder der Insassen vom Fahrgeschehen. Die Automatisierung benötigt weder das „Popometer“ für die Fahrdynamik, noch die Quer- und Längskraftwirkung, die mit der Fahrzeugbeschleunigung auf den Insassen wirkt. Sie kann auf die bewegungserfassenden Sensoren, die schon seit Langem für die elektronische Stabilitätsregelung verwendet werden, zurückgreifen, um die Trajektorie sowohl dynamisch als auch komfortabel zu regeln.

Ein Neigefahrwerk, wie im schienengebundenen Verkehr schon lange bekannt, könnte zumindest die üblichen moderaten Querbeschleunigungen von $1\text{--}2\text{ m/s}^2$ kompensieren, wozu Gesamtneigungswinkel von etwa $6^\circ\text{--}12^\circ$ benötigt werden. Dieser Gesamtneigungswinkel lässt sich durch den Neigungswinkel der Fahrbahn, den Fahrzeugaufbauwankwinkel und den Sitzwinkel darstellen (s. Abb. 13.4). Für die Seitenkraftkompensation erscheint es möglich, diese allein durch das Fahrwerk zu realisieren, wie die 2014 erfolgte Markteinführung im S-Klasse Coupé-Modell von Mercedes-Benz in ersten Zügen zeigt. Die für die Längskraftkompensation notwendigen Ein- und Ausfederungen betragen hingegen mehr als das Doppelte des heutigen Ein- bzw. Ausfederwegs. Wollte man auch hier eine Kompensation im genannten Bereich erreichen, kann dies nur mit einer (alleinigen oder zusätzlichen) Sitzverkipplung realisiert werden.

So faszinierend der Gedanke einer längs- und querkraftfreien Fahrt insbesondere für Ruhezeiten auch sein mag, so problematisch wird er bei gewünschter visueller Ankopplung des Menschen an die Umwelt werden, da dann der visuelle Eindruck nicht mehr mit dem kinästhetischen und vestibularen Eindruck übereinstimmt. Aber selbst bei visueller Ent-

kopplung kann die Drehbeschleunigung, die im Vestibularorgan sensiert wird, zu Unwohlsein führen, da sie im Gegensatz zur translatorischen Beschleunigung nicht kompensiert werden kann, sofern die Fahrgastzelle nicht gegenüber der Fahrzeugrichtung drehbar ist. Darüber hinaus ist die Neigungsverstellung nicht ohne Drehraten und -beschleunigungen durchzuführen, wodurch die Neigedynamik stark herabgesetzt wird. So wäre bei einer Wahrnehmungsgrenze für die Drehbeschleunigung (Rollen) von $4\text{ }^\circ/\text{s}^2$, wie sie aus Experimenten heraus bestimmt wurde [6, 7], der Zielwinkel für die Beschleunigungskompensation erst nach etwa 2,5 s erreicht. Dies kann bei einer sehr vorausschauenden autonomen Fahrweise ohne externe Störgrößen, wie z. B. andere Fahrzeuge, auf die mit höheren Beschleunigungsänderungen reagiert werden muss, in der Trajektorienplanung gerade noch berücksichtigt werden. Die verwendete Wahrnehmungsgrenze ist das Ergebnis eines Experiments und somit abhängig von dem zugrunde liegenden Testaufbau. Andere Experimente liefern abweichende Werte abhängig von dem entsprechenden Testaufbau, der Drehachse sowie der Testperson ($0,3\text{--}6\text{ }^\circ/\text{s}^2$). Eine Zusammenstellung unterschiedlicher Studien zu diesem Thema ist in [7, 9] zu finden.

Leichter erscheint es, die Beeinträchtigung durch vertikale Kräfte auszugleichen. In Kombination mit der Frontumfeldsensorik sollte ein Sänftengefühl möglich werden, das gegebenenfalls für sicherheitsrelevante Manöver abgeschaltet wird, um der Fahrdynamik Priorität einzuräumen. Elektronisch gesteuerte Luftfederkonzepte mit Verstelldämpfern oder vollaktive elektromechanische Feder-Dämpfereinheiten könnten die Basis für eine solche Sänfte sein. Dabei sind zur Vermeidung von niederfrequenten Nickbewegungen, ursächlich für die „Seekrankheit“, entsprechende Vorkehrungen in der Regelung zu treffen.

13.2.4 Auswirkungen auf den Innenraum und die Mensch-Maschine-Interaktion

Durch die Notwendigkeit des Verfügbarkeitsfahrers muss immer ein Fahrerarbeitsplatz zur Verfügung stehen. Daher wird die Einrichtung des Innenraums davon geprägt sein, dass in der vorderen Reihe ein instrumentierter Platz bereitsteht. Somit sind keine größeren Innenraumkonzeptveränderungen im Rahmen der hier betrachteten Use-Cases (Autobahnavtomat und Vollautomat) zu erwarten. Alternativ zur heute bekannten Fahrzeugsteuerung durch den Menschen per Lenkrad und Pedale kann ein alternatives Steuerungskonzept implementiert sein, das auf teilautomatisierte Grundfunktionalitäten aufsetzt, womit auch andere, platz sparende Bedienelemente verbunden sein können. Ansonsten findet sich bei mehreren Konzeptfahrzeugbeispielen die Möglichkeit, die Bedienelemente, im Besonderen das Lenkrad, an einen weniger störenden Platz zu bewegen, womit bei der autonomen Fahrt der Raum vor dem Fahrer für das „Alternativprogramm“ zur Verfügung steht. Eventuell ist auch eine Art Verriegelung der Betätigungselemente notwendig, damit nicht aus Versehen auf die Betätigungselemente zugegriffen wird und eine unbeabsichtigte Übernahme stattfindet.

Neben der Nutzung des Fahrerarbeitsplatzes als mobiles Büro zum Arbeiten oder als Medienplattform zur Unterhaltung ermöglicht die autonome Fahrt die Nutzung der Fahrzeit zur Erholung oder zur Kommunikation mit Mitfahrern. Entsprechend lassen Fahrzeuge bei diesem Use-Case erwarten, dass die Sitzkonzepte den jeweiligen Bedürfnissen Rechnung tragen, wobei vieles schon in heutigen Fahrzeugen, wenn auch nicht für den Fahrersitz, verwirklicht wurde.

13.3 Autonomes Valet-Parken

Das autonome Valet-Parken kann für Privat-Pkw das Parkplatzproblem im Wohnbereich oder an der Arbeitsstätte lösen helfen und für Carsharing-Nutzer die bisher als lästig empfundene Strecke vom Carsharing-Stellplatz zum gewünschten Einsteige- oder vom Aussteigeort überbrücken (s. Kap. 9). Außerhalb dieser Nutzung bleibt das Fahrzeug ein ganz „normales“ Fahrzeug, das die vorhandenen Fähigkeiten für assistierendes oder teil- bzw. hochautomatisiertes Fahren zur Verfügung stellen wird.

Wenn keine Insassen oder Gegenstände mehr in einem Fahrzeug vorhanden sind, besteht die Möglichkeit, den Freiraum im Fahrzeug durch ein variables Karosseriekonzept zu nutzen. Bereits heute existieren Konzepte mit dieser Funktion, die eine Reduktion der Ausmaße eines Fahrzeugs während des Parkens vorsehen. Allerdings sind den Autoren keine Serienanwendungen bekannt, da vermutlich die Anforderungen an eine hohe passive Sicherheit nicht mit den Anforderungen an eine variable Karosserie zusammenpassen. Das autonome Valet-Parken kann zwar durch vergünstigte Abstelltarife eine derartige platzsparende Option bevorteilen, umgekehrt aber auch den Druck auf eine platzeffiziente Unterbringung reduzieren, da der Weg zu einem großen Parkplatz ohne Kosten- und Zeitdruck nun automatisch bewältigt wird. Ob dabei der Kraftstoffverbrauch für den Weg zum Parkplatz höher ausfällt als der für den Parksuchverkehr, lässt sich im Voraus schlecht abschätzen.

Ansonsten folgen aus dem autonomen Valet-Parken keine weiteren grundlegenden Freiheitsgrade für das Fahrzeugkonzept.

13.4 Vehicle-on-Demand

Mit dem Use-Case Vehicle-on-Demand ist ein vollständig fahrerloses Fahrzeug gemeint, das keinen Fahrerarbeitsplatz zur Verfügung stellt und auf die Fahrerfähigkeiten nicht mehr zurückgreifen kann. Dadurch ergeben sich neue Freiheitsgrade für die Konzeption dieser Fahrzeuge, die im Folgenden für diesen Use-Case beschrieben werden. Da das Konzept eine Nutzung gegenüber Besitz favorisiert, ist davon auszugehen, dass die Nutzer das Fahrzeug in den meisten Fällen weder besitzen noch Halterverantwortung für das Fahrzeug übernommen haben. Stattdessen stellen Dienstanbieter diese Fahrzeuge für Mobilitätsdienstleistungen bereit (s. Kap. 9).

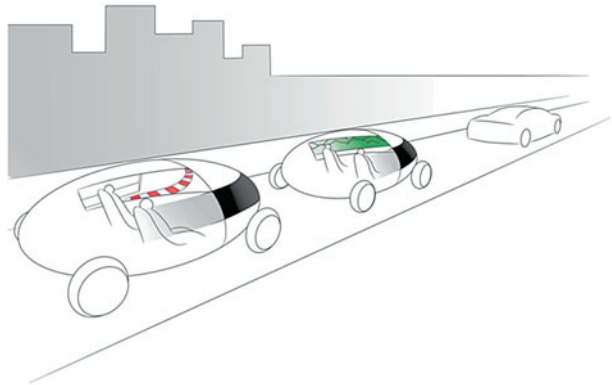
13.4.1 Auswirkungen auf das Karosseriekonzept

Bei dem nahezu alle Einsatzbereiche umfassenden Use-Case mit Fahrgeschwindigkeiten bis zu 120 km/h muss die Karosserie den Insassen Wetter- und Aufprallschutz bieten, der dem heutiger Automobile entspricht. Damit sind maßgebliche Konzepteinschränkungen verbunden. Ein geschlossener Fahrgastraum, möglicherweise mit Cabriodach, ist aus Wetterschutzgründen nötig. Zusätzlich ist für die Passagiere des Fahrzeugs eine sichere Hülle mit Rückhaltemöglichkeit vorzusehen, um die gleiche passive Sicherheit wie in heutigen Fahrzeugen mit Sitzgurt und Airbag zu gewährleisten. Diese Forderung besteht, solange keine vollständige, unfallfreie Betriebssicherheit des Straßenverkehrs gegeben ist, was zumindest im Mischverkehr mit Driver-only-Fahrzeugen derzeit nicht absehbar ist. Die Form des Fahrzeugs kann abhängig von Zweck und Zielgruppe heutigen Automobilen entsprechen, womit eine große Vielzahl von Varianten möglich ist. Die größte Raumökonomie bieten One-Box-Cars, die einem Quader gemäß ohne Absenkungen im vorderen oder hinteren Fahrzeugbereich auskommen. Natürlich werden sich die Designer bemühen, die jeweils gewählte Form so zu präsentieren, dass die Kundschaft passend angesprochen wird. Allerdings ist bei der Vielzahl der Einsatzmöglichkeiten eines Vehicle-on-Demand-Konzepts noch weitgehend offen, worauf das Styling zielen wird, insbesondere wie viel individuelle Emotionalität bedient werden muss. Ein Blick in die Historie der Straßenfahrzeuge zeigt, dass für nahezu jedes Karosseriekonzept Beispiele existieren, die als ästhetisch gelungen oder misslungen angesehen werden. Daher wird hier allein aus der Formgebung kein Trend vorhergesagt. Aber allen Fahrzeugen, deren Nutzungsbereich höhere Geschwindigkeiten als die hier angegebenen 120 km/h einschließt, werden aerodynamisch nach dem Stand der Technik geformt sein und allein schon deshalb Abrundungen sowie aerodynamisch bedingte Verjüngungen und Abrisskanten aufweisen müssen [10].

Die Hülle um die Passagiere hat neben der Schutzfunktion auch die Kopplung an die Umwelt zu übernehmen. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit der vollständigen Entkopplung, da keine Fahrersicht gewährleistet werden muss. Dies ermöglicht die von visuellen oder akustischen Störungen nahezu freie und private Nutzung der Kabine zu Unterhaltungs- und Erholungszwecken. Allerdings können die fahrdynamischen Einflüsse nur mit Einschränkungen isoliert werden, wie in Abschn. 13.2.3 und Abschn. 13.4.3 dargelegt wird. Es bleibt immer eine Herausforderung, die Stimmigkeit zwischen den Sinneseindrücken zu garantieren, da ansonsten Unwohlsein bis hin zur Übelkeit folgt, die kaum zur Akzeptanz solcher Isolationskonzepte führen wird. Abbildung 13.5 zeigt auf, wie eine solche vollständige Entkopplung während der Fahrt im öffentlichen Straßenverkehr aussehen würde.

Die Spanne der alternativen Beschäftigungen, die durch eine solche Entkopplung ermöglicht würde, ist groß und reicht vom Lesen in erholsamer „Umgebung“ (rechtes Fahrzeug) bis hin zu spannender Unterhaltung auf Rennstrecken (linkes Fahrzeug). Auch für die künstliche Darstellung der Umgebung bleibt die Herausforderung bestehen, die Stimmigkeit zwischen den Sinneseindrücken zu gewährleisten. Eine Wahlmöglichkeit über den Grad der Entkopplung über im einfachen Fall mechanisch betätigte Abdeckungen (Jalousien) oder über Hightech-Lösungen wie elektrochrome Scheiben erleichtert die

Abb. 13.5 Entkopplung der Passagiere vom realen Straßenverkehr



Kompromissfindung auf jeden Fall. Auch eine virtuelle Umweltkopplung über Kamera-Livebilder der Umgebung, die eingespielt werden können (Bildschirme, Projektion), ist denkbar, verlangt aber ein hohes Vertrauen der Passagiere in die Zuverlässigkeit der Technik. Die Fahrt in einem autonomen Fahrzeug sollte nicht mit der Furcht verbunden sein, dass man, wenn auch nur zeitweise, einer Isolationszelle ohne Umweltkontakt ausgesetzt werden könnte. Einen Mittelweg zwischen virtueller und realer Welt stellt die Anreicherung der Umweltinformation im Sinne einer „Augmented Reality“ dar, bei der z. B. kontakt-analog Hinweise auf Sehenswürdigkeiten eingeblendet werden.

13.4.2 Auswirkungen auf das Antriebskonzept

Allein aus dem Use-Case lassen sich keine Einschränkungen für den Antrieb ableiten. Sowohl klassische Verbrennungskraftmaschinen (VKM) als auch Elektroantriebe und deren Mischformen (Hybride) eignen sich grundsätzlich. Deren Vor- und Nachteile bleiben auch für das Vehicle-on-Demand bestehen. Diese sind einerseits Speicher- und Ladevorteile von chemischer Energie, die VKM-getriebenen Fahrzeugen eine größere Reichweite ermöglichen, und andererseits die Geräusch- und Schadstoffemissionsvorteile der Elektroantriebe, die im Besonderen in dicht bewohnten Gebieten geschätzt werden. Für ein Vehicle-on-Demand ist dafür zu sorgen, dass für die beabsichtigte Fahrt genügend Energie mitgeführt wird. Daher ist von einem Versorgungskonzept auszugehen, das in den Standzeiten die Energieaufnahme integriert. Passende Anlaufstellen werden diesen Service sowohl manuell als auch automatisiert anbieten können, sei es an herkömmlichen Tankstellen oder speziellen Stromtankstellen. Induktives Laden der Batterie bietet sich dafür in besonderem Maße an. Je nach Nutzungsgrad der Fahrzeuge fällt der Nachteil des höheren Zeitbedarfs für die Energiespeicherung bei Elektrofahrzeugen unterschiedlich aus: Sind die Standzeiten immer noch höher als die Fahrzeiten, fallen die Ladezeiten weitgehend in den Nichtnutzungsbereich und sind damit ohne hohe wirtschaftliche Belastung. Anders verhält sich das bei einem Nutzungsgrad der Fahrzeuge, der auf einen Betrieb nahezu rund um die

Uhr abzielt. Für dieses Ziel fallen die Zeiten für die Energiebereitstellung erheblich ins Gewicht, da das Aufladen von Batterien zu einem deutlich größeren Nutzungsabfall führt als das Nachtanken bei VKM-angetriebenen Fahrzeugen.

(Wasserstoff-)Brennstoffzellenantriebe werden durch Vehicle-on-Demand-Konzepte eher leichter umzusetzen sein, da ein Dienstanbieter – eventuell auch im Verbund mit weiteren Anbietern – die Tank-Infrastruktur besser in den Ablauf integrieren kann als herkömmliche Automobilnutzer. So können Abstellplätze (= Bereitschaftsplätze) und Wasserstofftankstellen sowohl örtlich als auch im Ablauf aufeinander abgestimmt werden. Auch die Routen können von vornherein auf die Verbindung zwischen Wasserstofftankstellen ausgelegt werden, sofern eine Füllung für den Mobilitätsdienst nicht ausreichen sollte. Ferner lassen sich auch unvermeidbare Verflüchtigungsverluste, die im Stand bei Wasserstoffdrucktanks auftreten, weitgehend minimieren, da die Standzeiten beim Vehicle-on-Demand bei wirtschaftlichem Betrieb sehr gering sein sollten. Trotz dieser Vorteile des Vehicle-on-Demand-Konzepts für die (Wasserstoff-)Brennstoffzellen-Technologie müssen sich beide Richtungen, also Vehicle-on-Demand sowie Wasserstoffantriebe unabhängig voneinander den Marktzugang schaffen. Eine (Zwangs-)Kopplung dieser Technologien bei Markteinführung verschlechtert die Chancen für beide, da dadurch nur eine Schnittmenge der Nutzungsmöglichkeiten zu einem beschränkten Marktvolumen führt, das zu klein ist, um für beide Technologien die Investitionen zu rechtfertigen.

13.4.3 Auswirkungen auf das Fahrwerk

Für die Kraftübertragung eines Vehicle-on-Demand werden weiterhin die Reifen zuständig bleiben, da sich weder die Vor- noch die Nachteile alternativer Konzepte (z. B. Luftkissen/Propeller, Magnetschwebeantrieb, Ketten) durch die Fahrzeugautomatisierung wesentlich verschieben. Die Anforderungen an die Fahrdynamik werden sich ebenfalls kaum ändern, und die Anforderungen an ein besonders sportliches Fahrwerk werden sich kaum im Lastenheft des Vehicle-on-Demand wiederfinden. Die Verzögerungs- und Ausweichfähigkeit (also Beschleunigung bis $\approx 10 \text{ m/s}^2$) wird gegenüber heutigen Automobilen kaum geringer ausfallen, auch wenn eine deutlich komfortablere Fahrzeugführung zu erwarten ist. Allerdings besteht bei Vehicle-on-Demand die Möglichkeit, schon prädiktiv die Manöver zu planen und dabei die Möglichkeiten der gegebenen Fahrdynamik optimal auszunutzen, wodurch sich für das Fahrwerkkonzept neue Möglichkeiten ergeben können.

Neben den zwei in den nächsten Abschnitten diskutierten Aspekten der Radanordnung und der Lenkkonzepte gelten insbesondere für Vehicle-on-Demand-Fahrzeuge, deren Einsatzzweck die Personenbeförderung auf längeren Strecken ist, die gleichen Überlegungen zur Entkopplung von der Fahrdynamik wie in Abschn. 13.2.3 beschrieben. Eine Entkopplung von der Fahrdynamik *und* der Umgebung verlangt zwar enormen technischen Aufwand, würde aber eine höhere Stimmigkeit der Sinneseindrücke ermöglichen, als wenn jeweils nur ein Teil der Eindrücke entkoppelt würde. Sollten empfindliche Güter transportiert werden, würde eine entsprechende Entkopplung ebenso nützlich sein.

13.4.3.1 Mögliche Radkonzepte für Vehicle-on-Demand

Mit Blick auf die Stabilisierungsaufgabe für einen menschlichen Fahrer ermöglicht das Vehicle-on-Demand die Auswahl eines Radkonzepts ohne Rücksicht auf aktuell geltende Anforderungen. Dieser Freiheitsgrad motiviert die erneute Bewertung existierender Konzepte mit weniger als vier Rädern für den Einsatz als Vehicle-on-Demand.

Wie Motorräder und Trikes belegen, sind auch weniger als vier Räder tauglich für Transportaufgaben. Grundsätzlich reicht sogar *ein* Rad für die Fortbewegung, wie Einradfahr(künstl)er immer wieder eindrucksvoll beweisen. Dabei kommt der Regelung der Lage des Schwerpunkts die Schlüsselrolle zu. Diese Stabilisierung könnte ein mechatronisches System übernehmen und somit nahezu jeden befähigen, ein Einrad-Fahrzeug zu bewegen. Zwei Methoden lassen sich dazu verwenden: Momentenerzeugung am Rad und Verschiebung von beweglichen Massen.

Das erste Konzept findet beim zweirädrigen Segway® PT (Personal Transporter) Anwendung [11]. Die „Gewichtsverlagerung“ über die Füße wird sensiert und dazu eine Neigung des Passagiers eingestellt, die mit der Beschleunigung zusammenpasst, sodass der resultierende Vektor aus Schwer- und Trägheitskraft immer durch die Verbindungslinie der Radaufstandspunkte geht. In gleicher Weise wird bei zwei Rädern hintereinander manövriert. Mit einem durch eine Lenkbewegung entgegen der Kurvenrichtung bewirkten Rollmoment wird eine Schräglage erzeugt, die dann den resultierenden Vektor von Zentrifugal- und Schwerkraft durch die Verbindungslinie beider Radaufstandspunkte führt. Ein Kugelantrieb könnte diese Stabilisierung grundsätzlich für beide Richtungen übernehmen. Trotzdem bleibt in starkem Maße fraglich, ob eine solche Stabilisierung im Kontext des autonomen Fahrens sinnvoll eingesetzt werden kann. Der Nutzer ist mit der Gewichtsabstützung immer stark eingebunden. Darüber hinaus sind diese Konzepte auf niedrige Geschwindigkeiten beschränkt, da vertikale Unebenheiten wie Bordsteinstufen oder Schlaglöcher sowohl die Regeldynamik als auch die Aktorleistungsfähigkeit überfordern und somit Stürze nicht verhindert werden können. Diese Überlegung trifft auch für die einachsigen Zweiräder wie das oben genannte Segway PT zu, bei Motorrädern sind diese Vertikalhindernisse nicht in der Querbewegung zu befürchten, auch wenn Phänomene wie das Lenkerschlagen (*Kickback*) die Sensitivität der Fahrzeugstabilisierung von Zweirädern deutlich macht.

Ähnlich dem Jonglieren mit den Armen bei Seiltänzern wird beim zweiten Konzept eine Masse so verschoben, dass der Schwerpunkt auch ohne Zutun der Insassen passend zur Längs- oder Querkraft verlagert wird. Zur Abstützung dieser Verlagerung werden kurzzeitig Drehmomente an den Rädern appliziert. Die Konzepte von Segway P.U.M.A. (Personal Urban Mobility & Accessibility) [12] wie auch die Umsetzung von General Motors als EN-V (Electric Networked-Vehicle) [13] werden im Zusammenhang mit dem autonomen Fahren verwendet. Durch die hohe Wendigkeit (Drehen auf der Stelle) und den geringen Platzbedarf bietet sich dieses Fahrzeug – selbstverständlich nicht nur auf das autonome Fahren beschränkt – für den innerstädtischen Bereich an. Als Nachteile stehen der permanente Stabilisierungsaufwand, der einen größeren Teil der mitgeführten Energie „verbraucht“, und die o. g. Empfindlichkeit gegenüber vertikalen Stufen, wobei diese prinzipbedingt geringer ausfällt, da die bewegliche Masse hier das zur Korrektur notwendige

Antriebsmoment verringern kann. Bisherigen Aussagen zufolge ist eine Höchstgeschwindigkeit von 25 Meilen pro Stunde entsprechend 40 km/h vorgesehen. Für einen Einsatz bis 120 km/h erscheint dieses Konzept kaum geeignet.

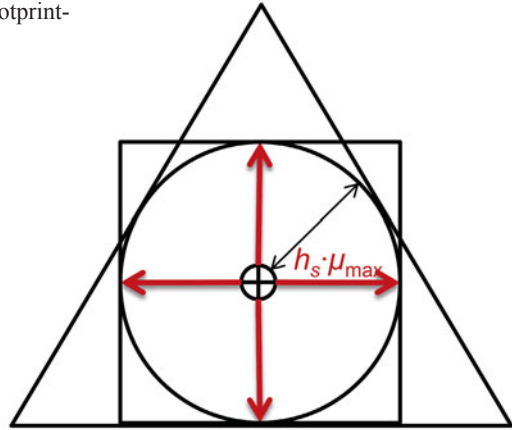
Für die klassische einspurige Zweiradanordnung mit Rädern hintereinander können ebenfalls verschiebbare Massen eingesetzt werden, wobei der Platzbedarf für die Verschiebmöglichkeit in Querrichtung schwieriger als in Längsrichtung bei einem einachsigen Zweirad zu befriedigen ist. Daher erscheint ein Lenkaktor, der das Balancieren übernehmen kann, für eine autonome Motorradführung aussichtsreicher. Allerdings bleibt fraglich, ob ein solches Konzept den Mobilitätswunsch für ein Vehicle-on-Demand erfüllen kann. Eine Vollverkleidung ist umständlich und erhöht die Seitenwindempfindlichkeit stark. Auszuschließen ist es jedoch nicht, denn zusätzlich zum Wetterschutz erhöht ein umschließender Rahmen die Sicherheit, wie der von 2000–2003 produzierte Motorroller BMW C1 demonstrierte [14]. In einer solchen Ausstattung ist ein einspuriges zweirädriges Vehicle-on-Demand denkbar, eventuell mit Stützrädern für sehr niedrige Geschwindigkeiten und den Stand ausgerüstet. Ob allerdings die besondere Mobilität von Einspurfahrzeugen, wie die Vorbeifahrt an aufgestauten Kolonnen, autonom fahrend umgesetzt werden kann, ist wieder eine andere Frage.

Eine gemeinsame Möglichkeit besitzen beide Ansätze: Sie können in einer Richtung kraftfreies Fahren liefern. Beim einachsigen Zweirad kann die Längskraft, beim einspurigen die Querkraft auf die Insassen vollständig kompensiert werden. Ob ein passiv die Fahrt erlebender Passagier dies als angenehm empfindet, ist allerdings offen.

Ab drei Rädern ist ein Fahrzeug ohne Regelung stabil, sofern der resultierende Kraftvektor aus Trägheits- und Schwerkraft die Fläche zwischen den Radaufstandspunkten umfassenden Verbindungslinien nicht verlässt. Abhängig von der Höhe des Schwerpunkts h_s und der zu berücksichtigenden Fahrdynamikgrenzen durch den maximalen Reibbeiwert μ_{max} beschreibt die Fläche des resultierenden Vektors mit der Fahrbahn einen Kreis mit dem Radius $r_{res} = h_s \cdot a_{max} / g = h_s \cdot \mu_{max}$ um den Mittelpunkt (s. Abb. 13.6). Der Mittelpunkt folgt aus der Projektion des Schwerpunkts in die x-y-Fläche der Fahrbahn. Die Fahrdynamikgrenzen ergeben sich aus den (betragsmäßigen) maximalen, auf die Erdbeschleunigung bezogenen Längs- und Querbeschleunigungen (hier als a_{max}/g für beide Richtungen gleich angenommen). Schneiden die äußeren Verbindungslinien der Radaufstandspunkte diesen Kreis, so besteht eine Kippgefahr schon im definierten Fahrdynamikbereich. Liegen sie außerhalb, so kann trotzdem unter ungünstigen Bedingungen ein Fahrzeug kippen, wie das berühmt gewordene Beispiel der ersten Mercedes-Benz A-Klasse bewies (weitere Details finden sich in [15]).

Die zur Kippsicherheit minimal nötige, durch die Radaufstandspunkte festgelegte sogenannte *Footprint*-Fläche ist bei einem Dreiradfahzeug $A_{FP,3} = 3\sqrt{3}r_{res}^2$ und somit um ca. 30 % größer als die quadratische Umfassung. Schwerwiegender ist die um 50 % größere minimale Breite eines dreirädrigen Fahrzeugs, das anders als in Abb. 13.6 mit zwei Eckpunkten in Längsrichtung orientiert ist (ansonsten in der gezeigten Lage 73 % vergrößerte Breite). Daher wird ein dreirädriges Fahrzeug mit rein statischer Abstützung auch als autonomes Fahrzeug kaum Anwendung finden.

Abb. 13.6 Für Kippsicherheit benötigte Footprint-Fläche



Eine hybride Fahrwerklösung, die einen für die statische Abstützung zu kleinen Footprint aufweist, ermöglicht die Verlagerung des Schwerpunkts, sodass der in Abb. 13.6 gezeichnete Kreis sich in Bezug zum Fahrwerk verlagert, sich z. B. in einer Linkskurve nach links verschiebt. Die Verschiebung ist grundsätzlich sowohl mit einer Translationsbewegung als auch einer Rotationsbewegung darstellbar. Für das Letztgenannte steht beispielhaft das dreirädrige Motorrollerkonzept des Piaggio MP3 [16] mit seinen beiden Vorderrädern und einer Parallelogramm-Kinematik, die eine Schräglage des ganzen Rolleraufbaus möglich macht. Somit besitzt dieses Fahrzeug eine zwar eingeschränkte statische Kippstabilität, benötigt aber keine permanente Regelung für konstante Bedingungen wie z. B. für Geradeausfahrt. In Verbindung mit der o. g. Verkleidung und dem Schutzrahmen käme ein solches Konzept durchaus als Vehicle-on-Demand in Frage, wenn die Transportaufgabe darin besteht, eine, vielleicht sogar zwei Personen zu transportieren.

In analoger Weise kann ein drittes Rad auch ein einachsiges Konzept wie den schon genannten EN-V ergänzen. Damit erfolgt die statische Abstützung durch ein vor oder hinter der Hauptachse angebrachtes Rad. Allerdings erfordert die Beibehaltung des Drehens im Stand eine Lenkbarkeit des Zusatzrades. Auch Vierradkonzepte mit für Kippsicherheit zu kleinem Footprint sind denkbar. Ein Beispiel hierfür ist die Nissan-Studie Land Glider [17], ein 1,10 m breites Fahrzeug, das bis zu 17° Querneigung annehmen kann. Ob diese im Vergleich zum Motorroller doch noch große Breite für ein Vehicle-on-Demand relevante Vorteile gegenüber einem in üblicher Breite ausgelegten einfachen Fahrzeug ohne Neigetechnik mit sich bringt, ist zu bezweifeln. Allein die mit der Neigetechnik verbundene Möglichkeit der Kompensation der Querkraft auf die Insassen könnte ein Pluspunkt sein. Neben Neigesystemen könnten grundsätzlich auch adaptive Fahrwerke mit variabler Spurweite oder variablem Radstand sowie variabler Schwerpunkthöhe zu einer Kippsicherheit nach Bedarf führen [18].

13.4.3.2 Lenkkonzepte

Heute dominiert bei Automobilen die Achsschenkelenkung an der Vorderachse, und es spricht wenig dagegen, diese auch für das Vehicle-on-Demand zu verwenden. Allerdings können alternative Lenkkonzepte durch das autonome Fahren aufgewertet werden. Dazu gehört zum einen das Kraftlenken, also über seitlich unterschiedliche Kräfte bis hin zu unterschiedlicher Kraftrichtung, z. B. für Linkseindrehen negative Antriebskraft links und positive rechts. Dieses Konzept ist beim einachsigen Zweirad das Mittel der Wahl. Für drei oder vier Räder verursacht das Kraftlenken erhebliche Verzwindungen, sofern nicht ein oder mehrere zusätzliche Drehfreiheitsgrade für die Räder ein Mitlenken unterstützen.

Auf der anderen Seite steht die mehrachsige Lenkung, oft als Vierrad- oder Allradlenkung bezeichnet. Obwohl grundsätzlich im Automobilbau bekannt, sind nur sehr wenige damit ausgestattete Fahrzeuge erhältlich. Eine Nutzeneinschränkung liegt in der Kompromissauslegung heutiger Allradlenkungsfahrzeuge, die ein Fahrzeugentwickler durchführen muss. Es gibt für den Fahrer keinen Zugriff auf die Hinterradlenkung. Sie ist (elektronisch) an die Vorderradlenkung gekoppelt. In einer Kompromissabstimmung unterstützt sie bei aktuellen Fahrzeugen im unteren Geschwindigkeitsbereich (≤ 100 km/h) die Fahrzeugagilität mit gegensinnigen Lenkwinkeln und bei höheren (≥ 100 km/h) die Stabilität durch gleichsinnige Lenkwinkel. Darüber hinaus erfolgen Lenkkorrekturen im fahrdynamischen Grenzgebiet. Eine autonome Trajektorienplanung könnte diesen Freiheitsgrad unabhängig von der Geschwindigkeit nutzen und entsprechend der geplanten Manöver einsetzen. So wäre ein Fahrstreifenwechsel auch ohne Gieren, also ohne Drehen um die Hochachse, möglich, wodurch die Rückwirkung auf die Passagiere reduziert werden kann. Beim Einparken lassen sich Manöver durchführen, die mit einer im üblichen Rahmen ausgelegten Allradlenkung nicht möglich sind, geschweige denn mit einer Standard-Vorderachslenkung.

Eine extreme Lösung wäre eine radindividuelle Allradlenkung, die zwar die Winkel aller Räder optimal stellen könnte, aber dafür noch aufwendigere Stellensysteme benötigt. Der Gewinn ist in Bezug auf die Anwendung als Vehicle-on-Demand gering. Er beschränkt sich auf eine eher für den Rennbetrieb relevante Verschiebung der Fahrdynamikgrenzen um wenige Prozent und die Reduktion des Kurvenwiderstands durch verzwindungsfreie Radführung.

13.4.4 Auswirkungen auf den Innenraum und die Mensch-Maschine-Schnittstelle

Wird das Vehicle-on-Demand für den Personentransport eingesetzt, ergeben sich die in Tab. 13.1 genannten Möglichkeiten der Art der Unterbringung, deren Ausrichtung und Anordnung. Grundsätzlich spricht hier nichts gegen die heute übliche Art der vor- und nebeneinander angeordneten, nach vorne gerichteten Sitze. Soweit es der Insassenschutz zulässt, kann auch davon abgewichen werden, und insbesondere sollte für die Erholung die Liegeposition offeriert werden, wobei die Ausrichtung offen bleibt, z. B. als Sitzbank in Querrichtung oder als Liegesitz in Längsrichtung.

Tab. 13.1 Allgemein mögliche Unterbringung von Insassen – Art, Ausrichtung, Anordnung

Art	stehen	sitzen	liegen	variabel
Ausrichtung	nach vorne	zur Seite	nach hinten	variabel
Anordnung	voreinander	nebeneinander	übereinander	variabel

Da keine Fahraufgabe von den Insassen zu übernehmen ist, bleibt im Wesentlichen das Interface auf die Zieleingabe, die Insasseninformation und einen Safe-Exit-Schalter, der ein Anhalten an nächster sicherer Position auslöst, beschränkt. Die ersten beiden können sogar vom Fahrzeug losgelöst sein und über ein Personal Device, ähnlich heutigen Smartphones, ermöglicht werden. Weitergehende Interaktionen sind für die Ambientesteuerung (z. B. Schließen der (elektronischen) Jalousien) und mögliche Unterhaltungsprogramme zu erwarten.

13.5 Use-Case-Gesamtbetrachtung

Autonomes Fahren unterscheidet sich weniger im Fahrzeugkonzept als in der Nutzung der Fahrzeit. Bei der heutigen Belegung von Autos mit statistisch 1,5 Personen [19] kann der Großteil der Personen nicht die Möglichkeiten nutzen, die ein Beifahrer heute schon besitzt, wie z. B. Lesen, Arbeiten oder Schlafen (s. Abb. 13.7). Dieses wird beim autonomen Fahren möglich. Darüber hinaus können Aktivitäten durchgeführt werden, die derzeit zu einer

Abb. 13.7 Nutzungsmöglichkeiten für Insassen beim autonomen Fahren



unzulässigen Ablenkung des Fahrers führen würden, z. B. multimediale Unterhaltung auf einem Großbild und Surroundklang bis hin zum sogenannten 4-D-Kino.

Eine weitere Änderung besteht im Nutzerkreis. War bisher immer ein Fahrer mit Fahrerlaubnis erforderlich, so entfällt zumindest beim Vehicle-on-Demand diese Einschränkung, sodass neue Nutzer das autonome Fahrzeug benutzen, die heutzutage allenfalls Mitfahrer im Fahrzeug sind. Dies können Personen sein, die aufgrund körperlicher Defizite (z. B. Sehschwäche) keine Fahrerlaubnis erhalten, oder aber Personen ohne Fahrerlaubnis wegen mentaler Defizite oder einfach aus Altersgründen ausgeschlossene Gruppen wie Kinder und Jugendliche. Entsprechend müssen das Fahrzeug- und das Betriebskonzept auch auf solche Nutzer angepasst werden. Zuvor müssen die Anforderungen definiert werden, welche Autorität die Insassen über das Geschehen im Fahrzeug und auf das Fahren haben werden.

13.6 Fahrzeugübergreifende Änderungen

Standen bisher die Einzelfahrzeuge im Fokus der Betrachtung, wird die Systemgrenze in diesem Abschnitt auf die Interaktion mit der Umwelt und anderen Verkehrsteilnehmern erweitert. Die Interkonnektivität der Fahrzeuge wird schon früher als Technik für alle (Neu-)Fahrzeuge etabliert sein, sodass sich damit nichts grundsätzlich Neues durch die Einführung des autonomen Fahrens ergibt. Allerdings steigt mit der Automatisierung der Fahrzeuge deren Leistungsfähigkeit, die neue Nutzungsweisen ermöglicht. Durch zu erwartende höhere Präzision autonomer Fahrzeuge sind elektronisch gesteuerte Manöver denkbar, die in dieser Form im heutigen Verkehr kaum denkbar sind. Zu diesen Möglichkeiten zählt das Konvoi-Fahren in sehr geringem Abstand oder das Fahren in besonders engen Fahrstreifen. Die Auswirkung auf den Verkehrsfluss wird anhand von Abb. 13.8 deutlich. Die Anzahl von Verkehrselementen, die die abgebildete Verkehrsfläche durchqueren, nimmt pro Zeiteinheit zu. Wird das mit entsprechenden Bevorrechtigungen gekoppelt, kann dies dem autonomen Fahren einen Schub geben. Abhängig von den mit solchen Bevorrechtigungen verbundenen Vorgaben kann sich auch das Fahrzeugkonzept ändern und mit diesen Vorgaben sogar das Aussehen. Wie weit eine solche Reglementierung in das Fahrzeugkonzept eingreifen kann, belegt die in der EU übliche Begrenzung der Gesamtfahrzeuglänge von Lkw. Dadurch sind alle Zugfahrzeuge in Europa mit einer steilen, platzsparenden Fahrzeugfront ausgestattet, während in Nordamerika ohne diese Art der Begrenzung die Motorhaube aerodynamisch günstiger nach vorn gestreckt ist.

Denkbar, wenn auch aus heutiger Sicht noch sehr ausgefallen, ist der Stoffaustausch während der Fahrt, wie es heute in der Landwirtschaft (z. B. Entladen des Getreideguts beim Mähen) oder in der Luftfahrt beim Betanken in der Luft bekannt ist. Für Gütertransport oder Personentransport könnte so Zeit und Raum gespart werden. Entsprechend müssen folglich Übergangszonen im Fahrzeugkonzept vorgesehen sein. In Abb. 13.8 wird dieses Prinzip dargestellt. Ein Lkw-ähnliches Langstrecken-Fahrzeug übergibt Güter während der Fahrt an das kleinere „Verteilerfahrzeug“. Die Fahrt wird mittels Automation präzise synchronisiert, und eine Art Brücke ermöglicht den Güteraustausch. Damit lassen

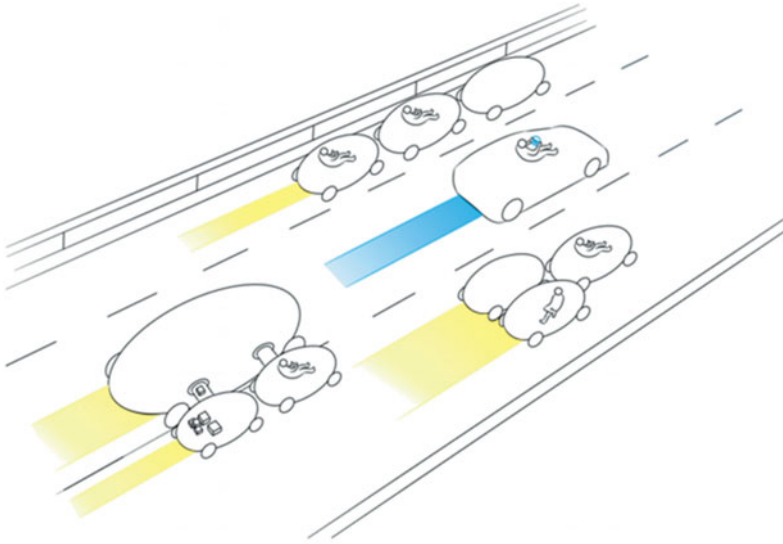


Abb. 13.8 Reduzierte Abstände zwischen den Fahrzeugen – ermöglicht durch die autonome Fahrt mit hoher Präzision

sich völlig neue Logistik- und Mobilitätskonzepte entwickeln, wobei aber ohne Diskussion des Gesamtsystems die Konzeption der Fahrzeuge wenig sinnvoll erscheint, weshalb hier keine entsprechende Vertiefung vorgenommen wird.

13.7 Folgekonzepte

Während die durchgängig behandelten Use-Cases das Potenzial besitzen, der für autonomes Fahren notwendigen Technologie zum Durchbruch zu verhelfen, kann eine Vielzahl von Anwendungen die selbst nicht ausreichend wären, eine Technologie zur notwendigen Reife zu führen, davon profitieren. Somit kämen straßentaugliche Serviceroboter infrage, die z. B. die Straßen, Rad- und Gehwege reinigen und sich selbstständig über öffentliche Wege von Einsatzort zu Einsatzort bewegen. Andere bisher auf Betriebshöfe eingeschränkte Transport- und Arbeitsmaschinen könnten diese verlassen, oder anders gesagt: Der Betriebshof erweitert sich auf öffentliches Gelände.

Damit verschwinden die Grenzen, die bisher noch um autonome Systeme gezogen werden, sowohl von der Skalierung her (vom Haushaltsroboter über Gehhilfe und Reinigungsroboter zum Postaustragemobil und Krankentransport) als auch bezüglich der privaten, öffentlichen und betrieblichen Bereiche ihres Einsatzes. Diese Konzepte hätten auf die Arbeitswelt einen großen Einfluss und könnten durch eine neue Rationalisierungswelle die Zahl der im Mobilitätssektor tätigen Menschen senken. Dieser Use-Case, dem Vehicle-on-Demand-Konzept folgend, besitzt das Potenzial, vor allem die Zahl der Berufsfahrer-

arbeitsplätze erheblich zu senken. Neben der Arbeitswelt könnten solche Fahrzeuge besonders den Zugang zu Waren revolutionieren, da der Weg vom Wunsch nach Waren bis zur physikalischen Auslieferung automatisierbar wird (s. Kap. 18). Modellversuche mit Multi-Copter-„Drohnen“ zeichnen diesen Weg für leichte Güter schon vor. Durch den nicht einholbaren Energieeffizienzvorteil von Radfahrzeugen wird die Nachfrage nach autonomen Radfahrzeugen für die Auslieferung schwererer Güter sicherlich kommen.

13.8 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassend lassen sich nach der Betrachtung der vier Use-Cases folgende drei Schwerpunkte für Konzeptänderungen identifizieren:

Die Fahrzeit beim autonomen Fahren bindet niemanden mehr an die Fahraufgabe. Dadurch entstehen Freiräume für die Nutzung dieser Zeit. Die unterschiedlichen Nutzungsziele werden einen starken Einfluss auf den Innenraum und die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle ausüben.

Die Entkopplung von der Fahraufgabe ermöglicht eine Veränderung der Ankopplung an die Umgebung. Dies gilt sowohl für den haptischen Kanal zur Entkopplung von fahrbahn- und fahrdynamikinduzierten Krafteinwirkungen auf die Insassen als auch für die visuelle Entkopplung. Allerdings besteht hier der Vorbehalt wegen möglicher visuell-vestibularer Konflikte, wie sie heute in Fahrsimulatoren zu beobachten sind. Diese werden erst dann gelöst, wenn eine vollständige Entkopplung in beiden Welten erreicht wird, d. h. gar kein visueller Eindruck von außen und keine Kraft auf die Insassen einwirken. Dies wäre nicht nur sehr aufwendig für das Fahrwerk zu realisieren, sondern möglicherweise für die Insassen beängstigend.

Da autonomes Fahren immer über eine By-Wire-Stelleransteuerung erfolgt, kann von einer sehr hohen Präzision der Bewegungssteuerung ausgegangen werden. Zum einen ermöglicht dies neue Lenkkonzepte, möglicherweise auch gekoppelt mit Vorrichtungen zur Kippsicherung bei Fahrzeugen mit einem zur alleinigen Kippsicherheit unzureichenden Footprint, insbesondere wenn eine Steuerung durch den Menschen nicht mehr vorgesehen ist. Andererseits ermöglicht diese Präzision die Kopplung an andere autonome, ebenso präzise Fahrzeuge, um die Infrastruktur besser auszunutzen oder heute noch ausgefallen anmutende Konzepte wie Car2Car-Stoffaustausch zu ermöglichen.

Mit Blick auf die Zukunft stellt sich die Frage, ob das autonome Fahren die Fahrzeugkonzepte revolutionieren wird.

Die Automation treibt eine Revolution der Fahrzeugkonzepte nicht an. Zwar werden manche Konzepte durch die Automatisierung weniger „benachteiligt“, die klassischen Fahrzeugkonzepte wie vierrädrige Pkw werden jedoch voraussichtlich auch in der automatisierten Straßenverkehrswelt dominieren. Für spezielle Nischeneinsatzbereiche ergeben sich aber neue Möglichkeiten, nur wird die Attraktivität dieser Nischen eher durch spezifische Regulierungen und Zugangsbeschränkungen getrieben als durch die Überlegenheit des Konzepts für den allgemeinen motorisierten Individualverkehr.

Wie schon heute wird auch bei autonomen Fahrzeugen die Nutzung des Konzept bestimmen, wobei die Nutzung der gewonnenen Fahrzeit gerade Innenraumkonzepte neu beleben wird.

Möglicherweise wird die Technologie des autonomen Fahrens den Markt noch weiter als heute differenzieren:

Auf der einen Seite werden teure komfortorientierte Hightech-Fahrzeuge, die Sänften gleichen, als rollendes Wohn-, Arbeits- oder Schlafzimmer dienen.

Auf der anderen Seite werden kostengünstige Zweckfahrzeuge eingesetzt werden, die die für den Transportdienst notwendige Ausrüstung mitbringen, aber darüber hinaus eher kleinen Stadtbussen gleichen und weder emotionale Anziehungskraft besitzen noch hohe Komfortansprüche befriedigen.

Die für autonome Fahrzeuge in den o. g. Use-Cases entwickelte Technologie wird noch viele Spin-off-Anwendungen nach sich ziehen, die die Dienstleistungswelt erheblich ändern können.

Literatur

1. Gasser, T. M.; Arzt, C.; Ayoubi, M.; Bartels, A.; Bürkle, L.; Eier, J.; Flemisch, F.; Häcker, D.; Hesse, T.; Huber, W.; Lotz, C.; Maurer, M.; Ruth-Schumacher, S.; Schwarz, J.; Vogt, W.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. Gemeinsamer Schlussbericht der BAST-Projektgruppe „Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung“ Dokumentteil 1. Wirtschaftsverlag NW, Bergisch Gladbach, Heft F 83, (2012)
2. Franz, B.: Entwicklung und Evaluation eines Interaktionskonzepts zur manöverbasierten Führung von Fahrzeugen. Dissertation, Institut für Arbeitswissenschaft, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, (2014)
3. Winner, H., Heuss, O.: X-by-Wire-Betätigungselemente – Überblick und Ausblick. In: Winner, H., Landau, K. (Hrsg.): Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug – Cockpits für Straßenfahrzeuge der Zukunft, Technische Universität Darmstadt, Ergonomia-Verlag, Stuttgart, (2005)
4. Futschik, H. D., Achleitner, A., Döllner, G., Burgers, C., Friedrich, J. K.-H., Mohrdieck, C. H., Schulze, H., Wöhr, M., Antony, P., Urstöger, M., Noreikat, K. E., Wagner, M., Berger, E., Gruber, M., Kiesgen, G.: Formen und neue Konzepte. In Braess, H.-H., Seiffert U. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik, 7. Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden, (2013), S. 119–219
5. Kammel, S.: Autonomes Fahren. In: Winner, H., Hakuli, S., Wolf, G. (eds.) Handbuch Fahrerassistenzsysteme, pp. 651–657. Vieweg+Teubner Verlag, (2012)
6. Durth, W.: Ein Beitrag zur Erweiterung des Modells für Fahrer. Fahrzeug und Straße in der Straßenplanung In: Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bonn-Bad Godesberg, H **163**, (1974)
7. McConnell, W.A.: Human Sensitivity to Motion as a Design Criterion for Highway Curves. Highway Research Board Bulletin(149), (1957)
8. Fischer, M.: Motion-Cueing-Algorithmen für eine Realitätsnahe Bewegungssimulation. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt in der Helmholtz-Gemeinschaft, DLR, (2009)
9. Betz, A.: Feasibility Analysis and Design of Wheeled Mobile Driving Simulators for Urban Traffic Simulation, Dissertation, Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, (2014)
10. Schütz, T.: Hucho – Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort, 6. Auflage, ATZ/MTZ-Fachbuch, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013

11. YSegway® Personal Transporter: <http://www.segway.de/segway-pt/das-original>, Abruf am: 26.08.2014
12. SegwayY® Advanced Developement, Project P.U.M.A: <http://www.segway.com/puma>, Abruf am: 26.08.2014
13. GM EN-V Concept: A Vision for Future Urban Mobility: <http://media.gm.com/autoshow/Shanghai/2010/public/cn/en/env/news.detail.html/content/Pages/news/cn/en/2010/March/env01.html>, Abruf am: 26.08.2014
14. BMW C1: http://de.wikipedia.org/wiki/BMW_C1, Abruf am: 26.08.2014
15. Baumann, F.: Untersuchungen zur dynamischen Rollstabilität von Personenkraftwagen, Fortschritt-Bericht VDI Reihe 12 Nr. 552, VDI-Verlag, Düsseldorf, (2003)
16. Piaggio MP3: <http://www.de.piaggio.com/piaggio/DE/de/news/MP3.html#main>, Abruf am: 26.08.2014
17. Schröder, C.: Tokyo Motor Show: Nissan präsentiert Stadtauto mit Neigetechnik, Verfügbar unter: <http://www.springerprofessional.de/tokyo-motor-show-nissan-praesentiert-stadtauto-mit-neigetechnik-10712/3946650.html>, Abruf am: 26.08.2014
18. Schweitzerhof, H., Betz, A., Winner, H.: Analysis of a situational adaptive chassis with respect to maneuverability and footprint. In: Proceedings of the ASME 2014 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference. IDETC/CIE 2014, Buffalo, New York, USA, August 17–20 (2014)
19. Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (infas), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR): Mobilität in Deutschland 2008, Ergebnisbericht: Struktur, Aufkommen, Emissionen, Trends, Bonn und Berlin, (2010)